

PARTIËLE FACTOREN IN RELATIE TOT DE WET VAN ARCHIMEDES

RUBRIEK NORMBESEF

Dit is het vijfde artikel in de *Cement*-rubriek Normbesef. In deze rubriek kunnen lezers onduidelijkheden in de constructeurspraktijk, bijvoorbeeld in de regelgeving, aankaarten.

Let wel: Hoewel de artikelen worden beoordeeld door experts, betreft het de persoonlijke interpretatie van de auteur. Aan de inhoud kunnen dan ook geen rechten worden ontleend. De artikelen geven ook niet altijd een antwoord of oplossing. Het doel van de rubriek is de sector te informeren over onduidelijkheden in de norm en daarmee een discussie op gang brengen. Dit kan leerzaam zijn, zo meent de redactie van *Cement*. Uiteraard voor de normcommissie, maar ook voor collega-constructeurs. Het uiteindelijke doel van de rubriek is meer duidelijkheid voor iedereen en in sommige gevallen misschien zelfs betere normen.

Een uitgebreidere toelichting op de rubriek staat in het artikel 'Nieuwe rubriek over normen: Normbesef' op [Cementonline](#).

Hebt u zelf ook een onderwerp voor deze rubriek, neem dan contact op met Jacques Linssen, j.linssen@aeneas.nl. Publicatie kan eventueel anoniem.

Met de partiële factoren die in de norm zijn opgenomen, lijkt er in de gangbare ontwerpmethodiek sprake van een overmatige veiligheid bij constructies onder water. Dit inzicht wordt in dit artikel toegelicht, mede aan de hand van een simpele case en vervolgens het project RiF010. Ook is een voorstel opgenomen voor een mogelijke toekomstige aanpak. Dit alles als voer voor een verdere inhoudelijke discussie.

Simpele case

De kwestie doet zich voor bij een constructie die zich permanent onder water bevindt. Hoe in deze situatie met partiële factoren in de praktijk wordt omgegaan, wordt toegelicht aan de hand van een voorbeeld. Stel men stort een poer op maaiveld met een volume van 1 m^3 en een volumegewicht van 25 kN/m^3 (eigenlijk 2500 kg/m^3 i.c.m. een versimpelde valversnelling van 10 m/s^2). De resulterende funderingsdruk komt dan logischerwijs op 25 kN (karakteristiek; BGT). Volgens Eurocode 0 volgt (via vergelijking 6.10a voor gevolg-

Tabel 1 Vergelijking simpele case met 1 m³ beton conform partiële factoren CC2

situatie	karakteristiek (BGT)			rekenwaarde (UGT) en overall veiligheidsfactor	
	neerwaarts (bruto)	opwaarts (Archimedes)	netto	netto neerwaarts (UGT)	factor (UGT/BGT)
1 m ³ beton op maaiveld	25 kN	0	25 kN	33,8 kN	1,35
1 m ³ beton onder water	25 kN	10 kN	15 kN	24,8 kN	1,65

klasse CC2) een partiële factor op deze blijvende belasting van 1,35, dus een rekenwaarde van de belasting van 33,8 kN (UGT).

Als diezelfde poer zich permanent onderwater bevindt dan treedt volgens Archimedes tegelijkertijd een opwaartse kracht op van $1,0 \text{ m}^3 \cdot 10 \text{ kN/m}^3 = 10 \text{ kN}$. De netto belasting van de poer komt daarmee op $25 - 10 = 15 \text{ kN}$ (BGT). In de gangbare ontwerp praktijk wordt er, vanuit een interpretatie van de norm en vigerende ontwerp richtlijnen, onderscheid gemaakt in de neerwaartse kracht (25 kN) en de opwaartse kracht (10 kN). Het gevolg is dat er in de UGT twee partiële factoren worden toegepast; voor neerwaartse krachten een factor 1,35 (ongunstig) en een factor 0,9 voor de opwaartse component (gunstig). Het resultaat is een UGT-belasting van 24,8 kN.

Niks vreemds op het eerste gezicht. Als je echter kijkt naar het veiligheidsniveau van beide situaties dan speelt er iets opmerkelijks. De 'droge poer' heeft namelijk een overall veiligheidsfactor (verschil tussen BGT en UGT) op de belastingen van 1,35 terwijl de 'natte poer' een overall veiligheidsfactor heeft van 1,65. De veiligheidsmarge is dus bijna 2x zo groot. De vraag die dit opwerpt: Waarom zou bij een kuub beton die zich onder water bevindt een veel grotere veiligheidsfactor in rekening moeten worden gebracht, dan bij een kuub beton die boven water wordt gestort?

Dit grote verschil is te verklaren door het uitgangspunt van twee fysiek 'losse' belastinggevallen (zonder onderlinge correlatie). Archimedes beschrijft een wetmatigheid en dus is er een correlatie tussen beide belastingcomponenten. Voor water geldt tevens dat het volumegewicht altijd rond 1000 kg/m^3 ligt. Bovendien zijn het volume van de betonpoer en het verplaatste water een-op-een gelijk. Dus ook als de poer onvoorzien 10% groter wordt gestort door bijvoorbeeld een afwijking in de bekisting, dan is de opwaartse kracht ook 10% groter. Er is dus een hele sterke correlatie; nagenoeg 100%. De resulterende onzekerheid in de belasting is daarmee terug te brengen naar een onzekerheid in het netto volumegewicht van de poer. Over het aandeel van het water (neerwaarts én opwaarts)

lijkt het overmatig conservatief om een veiligheid in rekening te brengen.

Case: Surfpool RiF010

Aanleiding voor dit inzicht is het project RiF010, een surfpool die op dit moment wordt gebouwd in de Steigergracht in Rotterdam. Voor de onderwaterbetonvloer geldt hetzelfde principe als voor de simpele case. Binnen het ontwerp van RiF010 wordt dit effect voor de eindfase versterkt door de aanwezigheid van water in de surfpool. Zie het kader 'Surfpool RiF010' voor een nadere toelichting en cijfermatige beschouwing.

Discussie, oplossingsrichtingen en vervolg

Ik ben er persoonlijk van overtuigd dat de stapeling van partiële factoren bij veel ondergrondse projecten leidt tot een overmatige veiligheidsmarge op de rekenwaarden van (funderings)belastingen, maar ik stel me hardop de vraag of ik misschien toch aspecten over het hoofd zie. Vooruitlopend op consensus hieromtrent, zijn er diverse oplossingsrichtingen mogelijk om deze overmatige veiligheid in het vervolg te kunnen voorkomen. Te denken valt aan:

1. Bijstellen van partiële factoren voor constructies die zich permanent onder (grond)water bevinden. →

auteurs



IR. RUUD ARKESTEIJN

Mobilis / TU Eindhoven



1 Bouw RiF010 in Rotterdam, foto: Paul Poels

OPMERKINGEN

Ten aanzien van het gestelde zijn een aantal opmerkingen te plaatsen.

Zeewater

Zout zeewater is zwaarder met een volumegewicht tot van 1020 tot 1028 kg/m³; dus maximaal +2,8%. Dit effect is dus verwaarloosbaar, te meer omdat ondergronds bouwen doorgaans in zoet of brak grondwater plaatsvindt. Bovendien volgt er vanuit de versimpelde valversnelling van 10 in plaats van 9,81 m/s² (in Nederland) dat alle krachten uit volumegewichten impliciet met 1,9% worden overschat. In een suspensie van slib of iets dergelijks kan het volumegewicht wel iets hoger zijn, maar nooit lager.

Modelonzekerheid

Partiële factoren dekken niet alleen de veiligheid af in relatie tot onzekerheden in belastingen, maar deze omvatten ook een component voor modelonzekerheid (ongeveer factor 1,1). In het voorbeeld in dit artikel is deze component niet beschouwd. Deze wordt in dit voorbeeld ook niet relevant geacht aangezien deze een heel eenvoudig en zuiver model beschrijft.

Verskil in waterstanden

Het voorbeeld beschrijft een situatie waarvan het gehele poervolume zich gegarandeerd onder water bevindt. Indien er onzekerheid is over welk deel zich onder water bevindt en/of er verschil in stijghoogte kan ontstaan onder en boven de poer, dan moet dit aanvullend worden beschouwd. Bijvoorbeeld door mogelijke verschillen in waterstanden/stijghoogtes te beschouwen als variabele belastingen (met hogere partiële factoren).

Ondiepe bouwkuipen

Eenzelfde stapeling en correlatie geldt ook voor een beschouwing van opwaartse krachten, omdat ook hier in het ontwerp een onderscheid wordt gemaakt in neerwaartse en opwaartse krachten (bijvoorbeeld een OWB-vloer na leegpompen bouwkuip). Dit is vooral significant voor ondiepe bouwkuipen/kelders. Bij toenemende diepte is de opwaartse waterdruk doorgaans dominant ten opzichte van het eigen gewicht van de constructie/vloer en benadert de overall veiligheidsfactor de waarde van de partiële factor op de waterdruk.

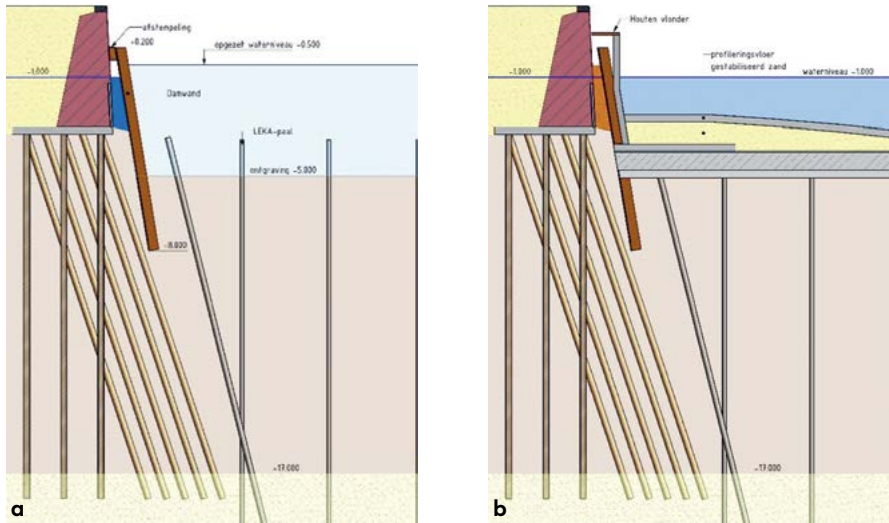
SURFPOOL RIF010

In het centrum van Rotterdam wordt gebouwd aan de surfpool RiF010. Hiervoor is vanwege de stabiliteit van de omgeving een natte bouwkuip voorzien met onderwaterbeton (fig. 2). In de bouwfase wordt de kuip drooggezet en worden de 283 palen hoofdzakelijk op trek belast. In de eindsituatie is de surfpool weer gevuld met (gracht)water en worden de betreffende palen (hoofdzakelijk) op druk belast. De drukbelasting bleek, mede door vermoeiing vanuit de golfbelastingen, maatgevend voor de constructieve doorsnede van de palen. De paalbelasting op druk is echter ook groter dan de paalbelasting op trek (in de droge bouwfase). Het water én waterpeil in de surfpool zijn (in rust, dus zonder golven) gelijk aan het grachtwater. Bovendien is in de natte bouwkuipfase het water 0,5 m opgezet totdat de SVOWB-vloer volledig is gestort. In de plastische fase van het beton rust deze op de bedding. Er was dus in de initiële situatie, waarin de palen nog spanningsloos zijn, meer gewicht (beton en water) in de kuip aanwezig dan in de eindfase. In ruststand (zonder golven) zijn dus geen significante drukbelastingen op palen te verwachten, terwijl het constructieve rekenmodel dat wel laat zien (voor zowel de BGT als UGT).

Cijfermatige analyse

Zowel de waterdruk onder de vloer als het water in de surfpool (in rust) zijn beschouwd als blijvende belasting, omdat beide peilen worden beheerst op hetzelfde streefpeil (gelijk aan polderpeil gracht). De variaties vanuit de golven zijn beschouwd als variabele belasting. De maximale drukbelasting per paal in het diepe deel ligt rond de 700 kN in de UGT, terwijl de maximale BGT-belasting daar ongeveer 350 kN bedraagt; een factor 2,0 verschil. Dit is opvallend, aangezien de maximale partiële factor slechts 1,5 bedraagt. Dit geldt voor de variabele golfbelasting, die omvat slechts 1/3 van de totaal in rekening gebrachte belasting. De verklaring voor de hoge overall veiligheidsfactor ligt deels in lijn met de eenvoudige case zoals eerder beschreven. Voor de betonvloer (SVOWB-vloer) op circa 4 m onder het grachtpeil geldt namelijk een vergelijkbare stapeling van ongunstige en gunstige partiële factoren. Het grootste aandeel komt echter voort uit het water in de surfpool. Deze is als neerwaartse blijvende belasting verdisconteerd met een factor 1,35 en de opwaartse waterdruk (gemodelleerd als opwaartse belasting onder de vloer) met een factor 0,9. Hiermee wordt voor het surfpoolwater, dat zich permanent onder het grachtpeil bevindt, een rekenkundige belasting gecreëerd die gelijk staat aan $(1,35 - 1,0) \cdot 10 + (1,0 - 0,9) \cdot 10 = 4,5$ kN per m³. Dit is een fictieve belasting, omdat het water in de surfpool feitelijk zichzelf draagt volgens het principe van Archimedes. Voor de gehele surfpool gaat dit om 4000 m³ aan water met dus een (fictief) rekenkundig belastingaandeel van 18.000 kN op de fundering. Een benadering op basis van netto volumegewichten zou voor het diepe deel van de surfpool RiF010 resulteren in een reductie van de rekenwaarde van paalbelastingen op druk met ruim 25%. Deze ontwerpbenadering zou, inclusief golfbelasting, nog altijd resulteren in een overall veiligheidsfactor (UGT/BGT) van bijna 1,40.

Binnenkort verschijnt in *Cement* een artikel over de bijzondere bouwtechnieken en golfbelasting bij RiF010.



2 Bouwkuip Rif010; (a) situatie na leegpompen bouwkuip en (b) eindfase met profileringsvloer en grachtwater

2. Specifieke ontwerpaspecten, zoals de geotechnische draagkracht van palen, toetsen en ontwerpen op basis van andere grenstoestanden (bijvoorbeeld de factoren voor GEO aanhouden conform EQU/UPL i.p.v. STR).
3. Eigen onderbouwing van de, bij de van toepassing zijnde betrouwbaarheidsindex (β) behorende, rekenwaarden (doorgaans complex).
4. Het rekenen met netto (volume)gewichten i.p.v. het opknippen in (bruto) neerwaartse en opwaartse belastingen.

Laatstgenoemde oplossing geniet mijn persoonlijke voorkeur. Deze is generiek toepasbaar en in tegenstelling tot opties 1 t/m 3 maakt deze het ontwerp(model) niet onnodig complex. Op basis van de wet van Archimedes, de betrouwbaarheid van gewicht van water en de een-op-een relatie tussen de volumes van het ondergedompelde object en het verplaatste water, acht ik deze aanpak acceptabel vanuit de veiligheidsfilosofie van de norm. NEN-EN 1990 biedt hiervoor ook mogelijkheden. Partiële factoren zijn gebaseerd op het 'one-source-principe' (zonder onderlinge correlaties). Onder tabel Tabel NB.4 – A1.2(B) staat het volgende:

"Het onderscheid tussen gunstig en ongunstig werkende blijvende belasting hoeft bij STR/GEO alleen te worden gemaakt voor het totaal van alle belasting van een soort, zoals eigen gewicht."

In het voorbeeld van de simpele case en Rif010 is het volume van het te storten beton (en terug te brengen

grachtwater) de oorsprong van zowel de neerwaartse als de opwaartse kracht. Conform bovenstaande passage dient voor dit aandeel geen onderscheid in gunstig/ongunstig te worden gemaakt. Dit kan relatief eenvoudig worden bereikt door in het rekenmodel netto volumegewichten in te voeren voor het eigengewicht en waterdrukken bijvoorbeeld te modelleren op bovenzijde vloer in plaats van de onderzijde. Tegelijkertijd ben ik wel voorstander van een betere beschouwing van de maximale verschillen in waterstand/stijghoogtes en deze te verdisconteren met partiële factoren conform een variabele belasting (1,5 voor CC2).

Ik ben benieuwd hoe collega-constructeurs aankijken tegen dit vraagstuk en de geopperde aanpak. In het kader van (kosten)efficiënt bouwen en vooral duurzaamheid (onnodig grondstoffengebruik) hoop ik dat dit artikel zal leiden tot een geoptimaliseerde en breed geaccepteerde aanpak voor toekomstige ondergrondse projecten. ●

MEEDISCUSSIËREN

Wil je reageren of heb je een eigen inzicht bij dit onderwerp? Laat dan een reactie achter bij dit artikel op www.cementonline.nl/normbesef-5.

